УДК 629.783.5235 : 519.7 : 62-05

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ Е-СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Г.П. Цапко, С.Г. Цапко, Д.В.Тараканов*

Томский политехнический университет
*Сургутский государственный университет
E-mail: serg@aics.ru

Раскрыты методологические основы построения динамических моделей гибридных систем с использованием принципов «блочного» моделирования на базе Е-сетевого формализма. Представленная методика основана на использовании механизмов иерархического взаимодействия элементов динамической моделей. Показаны принципы организации Е-сетевых иерархических схем с использованием жестких и гибких структур. Указан механизм взаимодействия статических и динамических компонентов.

В настоящее время происходит существенное усложнение автоматизированных систем управления различными технологическими процессами. Это предъявляет новые, более жесткие требования к подготовке обслуживающего персонала данных систем. Полноценное использование многофункциональных компьютерных тренажеров (МКТ) возможно только в том случае, если его программное обеспечение способно функционировать в реальном масштабе времени или ускоряя моделируемый процесс.

Для решения данной проблемы необходимо выработать общие подходы в организации Е-сетевой [1] аналитико-имитационной модели (АИМ).

Важным вопросом в построении аналитико-имитационной модели (АИМ) исследуемой системы является выработка общих подходов в организации Е-сетевой модели. Методология построения АИМ сложных систем базируется на объектном подходе к организации исследуемой модели и состоит из следующих основополагающих позиций:

1) любая модель представляет собой совокупность однонаправленных объектов (в дальнейшем используется термин-компонент *Comp*), взаимодействующих между собой, что позволяет реализовывать причинно-следственный подход в построении модели;
2) компоненты модели выбираются с учетом минимального числа взаимосвязей между компонентами модели и минимальным уровнем взаимодействия (т.е. интенсивностью обмена данными) между компонентами;
3) обмен данными происходит с помощью каналов связи;
4) компоненты модели строятся по иерархическому принципу;
5) в модели может выполняться несколько независимых друг от друга процессов, т.е. компоненты могут функционировать параллельно и независимо друг от друга;
6) с компонентами модели могут ассоциироваться как конкретные технические объекты системы и ее элементы, так и абстрактные математические объекты, например операторы преобразования.

АИМ исследуемой технической системы Σ_0 представляется как объединение компонент с определенной взаимосвязью. Количество компонентов модели определяется режимом работы МКТ и степенью детализации системы. Каждая компонента модели технической системы, реализованная на Е-сетевом имитационном аппарате, может быть представлена иерархической структурой «вход – состояние – выход». Функционирова-

ние компонент модели рассматривается в Е-сетевом аппарате, на счетном множестве моментов времени $T=\{t_0,t_1,...,t_v,...\}$.

В результате взаимодействия компонентов модели друг с другом и обработки потока данных от модели внешней среды происходит множество событий $E=E'\cup E''$, где E' – подмножество внешних событий, $E'=\{E'_1,E'_2,...,E'_\mu\}$, характеризующих появление входных сигналов $\{X_\mu\}$, E''– подмножество внутренних событий, $E''=\{E''_1,...,E''_K\}$. В качестве внутренних событий могут выступать начало, окончание вычислительного процесса, а также посылка сообщения (фишки) другим компонентам. Действие модели производит изменение вектора состояния системы $\overline{Z(t_v)}\, z\in R$. В общем случае состояние системы может иметь иерархическую структуру. Состояние любого объекта характеризуется фазовыми переменными $\overline{Z_l(t_v)},\{z_l,l=\overline{1,L}\}$ в момент времени $t_v\in T$. Вектор состояния $\overline{Z_l(t_v)}$ формируется за счет обработки внешних (входных) воздействий и внутреннего состояния компоненты в t_{v-1}. Обмен данными между объектами, как уже отмечалось выше, осуществляется по каналам связи путем перемещений фишек V_i по сети. Входным сигналам $\overline{X(t_\mu)},\{x_\mu,\mu=1,M\}$ присваивается значение только «извне», т.е. при считывании компоненты атрибутов фишки. Выходным сигналам $\overline{Y(t_\xi)},\{y_\xi,\xi=1,\Xi\}$ можно присвоить значение только «внутри» блока компонент модели. Входом/выходом являются: управляющие команды, в том числе служебные, физические характеристики компонент, а также данные о внешней среде.

При построении АИМ предлагается определять модель как совокупность *статических* Stc_i, $i=\{1,...,N\}$, и *динамических* компонент Dc_j, $j=\{1,...,M\}$ $Stc\cup Dc\subset M_D$. В подмножество статических компонент $Stc=\{Stc_i\}$ модели технической системы входят элементы, которые *постоянно* физически присутствуют в технической системе и не зависят от фазы технологического процесса, протекающего в данный момент времени, и выполняют заранее определенную функцию, т.е. являются постоянным ресурсом системы. Статические компоненты (СК) характеризуются определенной структурой *Struc*, алгоритмом функционирования *Alg*, оператором преобразования переменных $H{:}X\xrightarrow{\Delta t}Y$ и длительностью реакции системы Δt. Таким образом, статическими компонентами модели являются элементы системы управления технологическими процессами (управляющая ПЭВМ, исполнительные механизмы, датчики и т.д.), а также элементы самого объекта управления. Динамическими компонентами (ДК) модели являются переменные ресурсы в технической системе и характеризуются тем, что у них происходит качественное и количественное изменение физических (информационных) параметров в зависимости от фазы ТП. Динамическими компонентами в технических системах являются материальные (топливо, теплоносители, электрический ток и др.) и информационные потоки с заданной совокупностью параметров, над которыми совершают действия СК. В аппарате Е-сетей ДК представляется фишкой V_{DC} со структурированным набором атрибутов: *X*, *Z*, *Y*, *Ind*, где $Ind\in N$ – идентификационный параметр фишки.

Для формирования модели с учетом причинно-следственных связей необходимо ввести следующие виды компонент: управляющие и управляемые компоненты. Объекты, которые *совершают действия* (технологические, управленческие операции и др.) *над другими объектами* системы (динамическими), или эти действия носят доминирующий характер, называются управляющими компонентами – *Contr_C*. Объекты системы, над которыми совершаются действия, или этот процесс является преобладающим, называются управляемыми компонентами – *Dir_C*.

Во время функционирования модели каждая компонента может являться либо *активным*, либо *пассивным* объектом. Активная компонента имеет возможность инициировать действие, т.е. изменять свои данные и передавать сообщения независимо от внешнего окружения. Пассивные компоненты изменяют значение данных только при наличии внешнего воздействия. Активными компонентами модели являются:

1) генераторы внешней среды;
2) генераторы неисправностей устройств и элементов модели системы;
3) имитатор деятельности оператора.

Обмен данными между компонентами модели производится посредством передачи сообщения, где носителем информации Е-схеме является фишка.

Структурная схема взаимодействия компонент системы представлена на рис. 1, где каждый статический компонент модели обладает следующей структурой:

1) совокупностью входных $X^{L(i)}_{stc(k)}$ и выходных $Y^{L(i)}_{stc(k)}$ каналов *k*-й компоненты модели, где L_i – связь между *k*-м и *i*-м объектами;
2) совокупностью входных X_{Mk} и выходных Y_{Mk} каналов между внешними элементами модели (подсистем профилирования, задатчиком внешних воздействий) и *k*-компонентой;
3) уровнем иерархии $g_k\in N^{Gk}$.

У динамических компонент также присутствуют входные, выходные переменные: X_{Dc}, Y_{Dc} и вектор состояния Z_{Dc}.

Процесс взаимодействия компонент модели в общем виде записывается в следующей форме: $Inter(Stc_1(\{x_1,x_2,...,x_l\}),\ Stc_2(\{y_1,y_2,...,y_p\}),\Delta t,Alg)$, где *Inter* – правило взаимодействия двух компонент модели согласно заданному алгоритму *Alg* на интервале времени Δt; $Stc_n(\{x_1,x_2,...,x_l\})$ – *n*-я компонента модели с параметрами $x_1,x_2,...,x_l$; $Stc_m(\{y_1,y_2,...,y_p\})$ }) – *m*-я компонента модели с параметрами $y_1,y_2,...,y_p$.

Взаимосвязь между статическими и динамическими компонентами показана на рис. 1 пунктирными линиями, причем толщина линий отражает

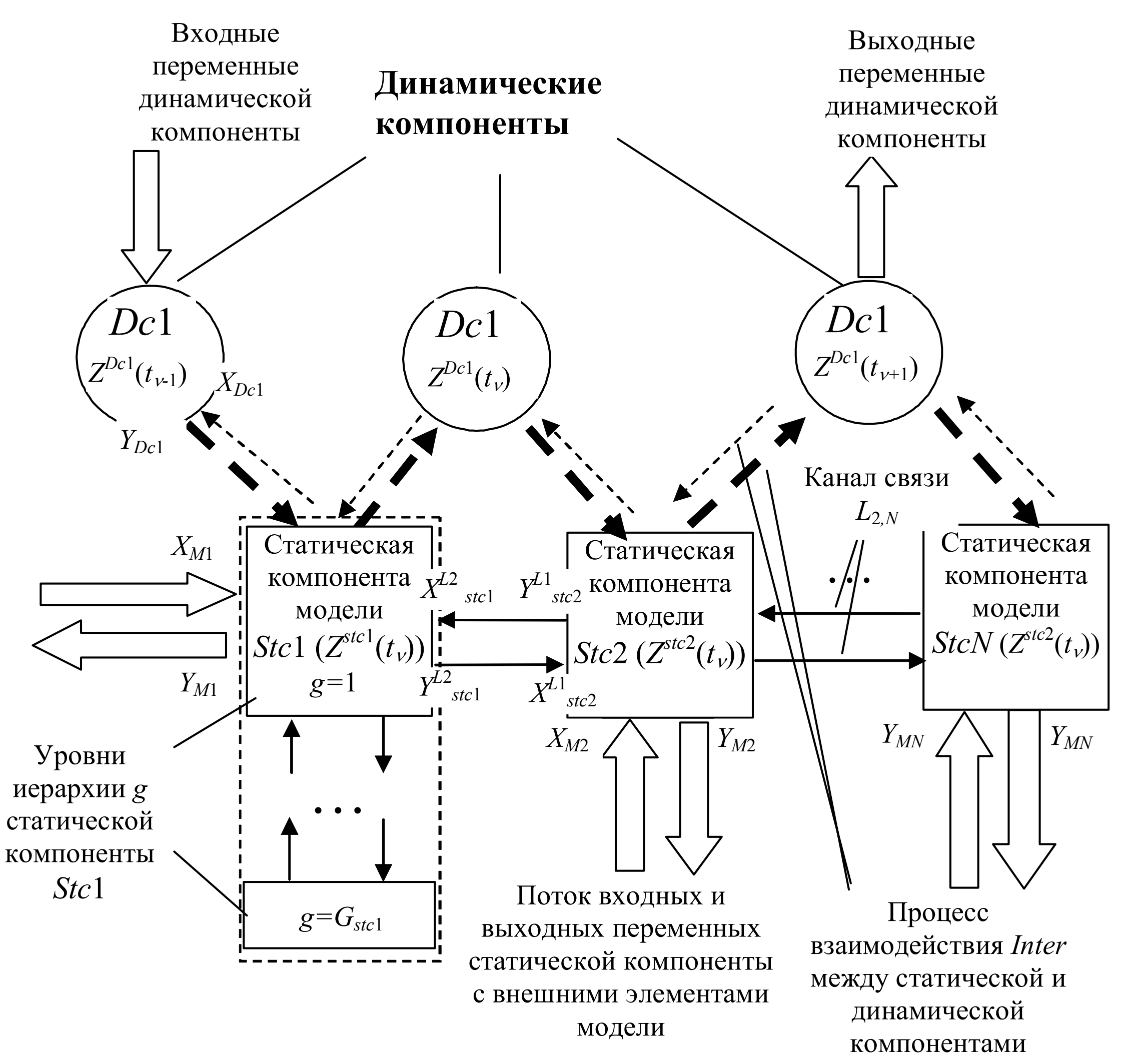


Рис. 1. *Структурная схема взаимодействия статических и динамических компонент системы*

уровень информационного потока между компонентами системы. Процесс взаимодействия между СК и ДК можно проиллюстрировать на следующем примере: сетевая вода (*Dc*), которая задается в модели потоком фишек, обладает совокупностью характеристик: температурой $z_1(t)=T$ и концентрацией примесей (солей) в теплоносителе $z_2(t)=N_s$. При протекании по трубопроводу (*Stc*) теплоносителя у динамической компоненты, в процессе взаимодействия со статическим элементом модели, формируются физические обобщенные характеристики: давление воды, скорость воды, турбулентное/ламинарное течение, перепад давления между входом и выходом, температура на выходе. При рассмотрении физических процессов в длительном интервале времени (сутки, месяцы), т.е. моделировании длительного по времени взаимодействия двух рассматриваемых компонент, происходит увеличение гидравлического сопротивления трубопровода за счет отложение солей. При превышении гидравлического сопротивления выше критического состояние компоненты [трубопровода] принимает новое значение {«НЕИСПРАВНОСТЬ» $P>P_{\max_out}$}.

Реализация статических компонент модели основана на использовании совокупности *EN*-элементов: переходов, позиций, очередей с постоянной во времени структурой. Динамические компоненты целесообразно реализовывать с помощью фишек, которые обеспечивают свойство переменности присутствия в системе путем продвижения по Е-сетевой схеме с вычислением эндогенных параметров.

При создании АИМ в *EN*-базисе целесообразно возложить на Е-сетевые переходы/макропереходы следующие функции:

1. реализацию событий *E*, т.е. переход C_j выполняет действие некоторого элемента системы.
2. генерирование внешних воздействий;

Соответственно позиции Е-сетевой модели выполняют следующие функции:

1) определяют условие срабатывания переходов, т.е. выполняют функцию охраняющего предиката перехода;
2) определяют качественное состояние системы, например наличие фишки в позиции говорит о том, что устройство включено, и т.д.

Фишка является носителем информации о состоянии системы, ее объектов, а также внутренних и внешних команд. Атрибуты фишки содержат следующие данные: экзогенные и эндогенные переменные, идентификаторы физической величины, параметры компонент модели и т.д.

Помимо представления АИМ в виде взаимодействующих пространственных иерархических компонент между собой, в основе методики моделирования систем лежит важный принцип декомпозиции процессов во времени [2]. По отношению к модельному времени все компоненты модели делятся на три категории: *сосредоточенные*, *условно-сосредоточенные* и *распределенные*. Сосредоточенные компоненты в модельном времени всегда выполняются мгновенно. Выполнение любого другого из прочих элементов обычно имеет ненулевую продолжительность и может распределяться между несколькими последовательными шагамим имитации. Условно-сосредоточенные и распределенные элементы отличаются друг от друга режимами появления во времени своих результатов, под которыми надо понимать новые значения каких-либо фазовых переменных. Для условно-распределенного элемента они определяются только в момент его окончания, и нет никаких генерируемых этой компонентой данных, которые появляются на промежуточных шагах для немедленного использования другими компонентами модели. При работе распределенной компоненты вычисления осуществляются на промежуточных этапах.

Реализацию сосредоточенного процесса в простейшем случае можно создать с помощью *T*-перехода (рис. 2). При нулевой установленной задержке срабатывания *T*-перехода происходят преобразование атрибутов фишки и запись экзогенных переменных в атрибуты.

На рис. 3 Е-сетевая алгоритмическая вычислительная структура осуществляет процесс вычисления требуемых выходных переменных и состояния системы, т.е. позволяет реализовать компоненты, работающие в распределенном во времени режиме моделирования.

Если промежуточные выходные каналы не использовать в алгоритмической структуре (см. рис. 3), то данная схема может быть использована в качестве условно-распределенной временной компоненты.

На рис. 4 показана обобщенная Е-сетевая функциональная схема логико-динамической модели некоторой компоненты системы. В модели любая компонента представлена хотя бы одним уровнем иерархии, как правило, логическим.

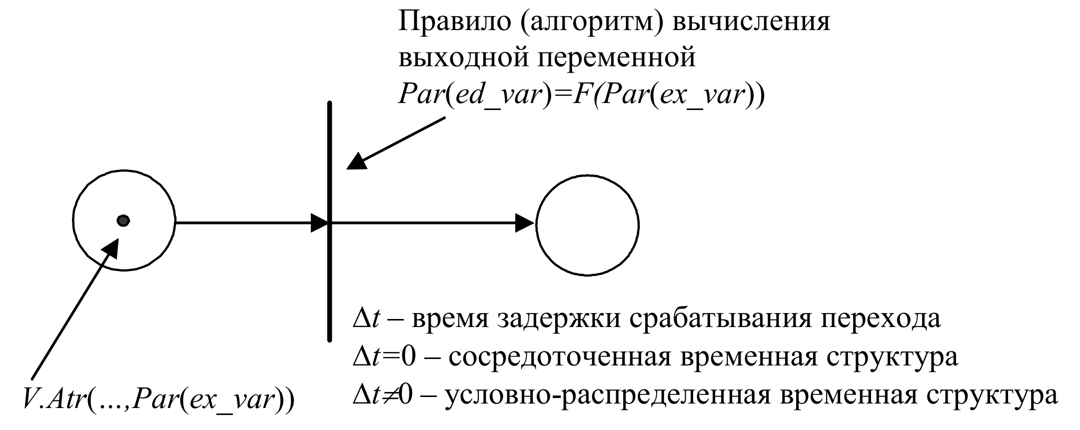


Рис. 2. *Реализация компоненты модели с сосредоточенной или условно-сосредоточенной временной характеристикой*

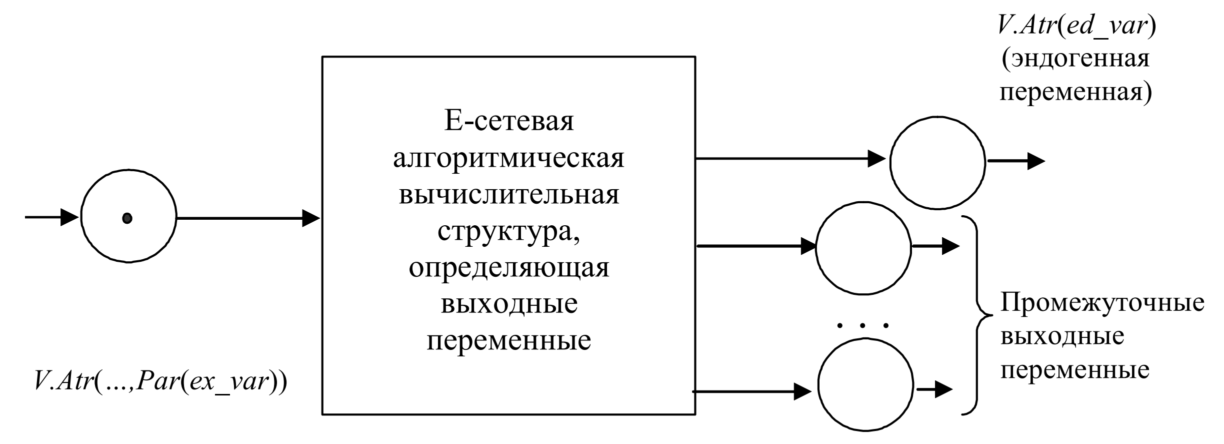


Рис. 3. *Реализация компоненты модели с распределенными временными характеристиками*

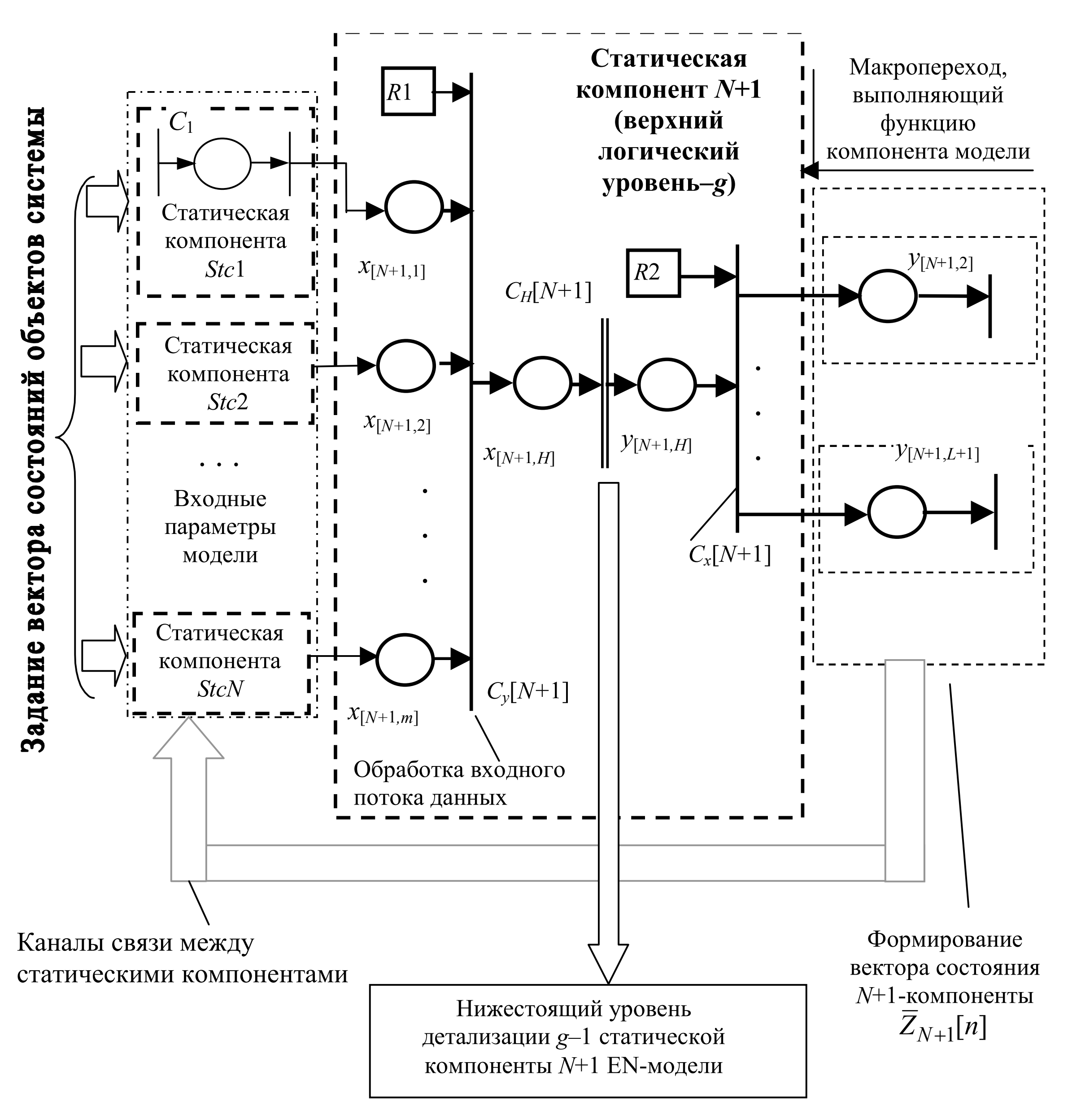


Рис. 4. *Обобщенная функциональная схема компонентов динамической модели технической системы*

Нижние уровни содержат Е-сетевые алгоритмические схемы имитации динамических процессов [3, 4] например схемы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, интерполяционные схемы Лагранжа и т.д., т.е. представленный уровень необходим для воспроизведения динамических процессов в любой момент времени. Семантический смысл переходов компоненты, представленной на рис. 4, следующий:

$C_1,...,C_n$ – являются генераторами вектора состояния i-го объекта, i={1,...,n};

$C_{y[N+1]}$ – обработчик полученных данных о состоянии i-го объекта;

$C_{H[N+1]}$ – осуществляет вычисление эндогенных переменных;

$C_{x[N+1]}$ – формирует вектор состояния N+1-го объекта системы.

Семантический смысл позиций:

$b(x_{[n+1,1]}),...,b(x_{[n+1,m]})$ – соответствует наличию заявок о состоянии смежных статических объектов от i-го объекта;

$b(y_{[n+1,1]})$ – заявка от i-го объекта обслужена;

$b(y_{[n+1,2]}),...,b(y_{[n+1,m+1]})$ – позиции глобальных состояний системы.

Описание переходов:

$C_{y[n+1]}=(Y(R1,b(x_{[n+1,1]}),...,b(x_{[n+1,H]})),(t_1,t_2,...,t_n\to 0),-)$ – ввод информационных потоков от статических и динамических объектов;

$C_{H[n+1]}$=(иерархическая организация перехода) – выполняет процесс вычисления эндогенных переменных с использованием алгоритмической схемы моделирования;

$C_{x[n+1]}=(X(R2,b(y_{n+1,H}),...,b(y_{[n+1,m+1]})),(\Delta t^*),\text{-})$ – выбор глобального состояния $N+1$ статической компоненты системы и/или изменение физических параметров динамической компоненты. $L1=\{1,...l_1\}$ число *глобальных* состояний объекта;

Δt^* – задержка срабатывания перехода $Cx_{[n+1,2]}$ определяется быстродействием $N+1$-компоненты и режимом работы объекта (например, включение объекта – 2 с, отключение – 0,9 с). При моделировании процессов в требуемом масштабе времени Δt^*_M вычисляется по формуле:

$$\Delta t^*_M=\Delta t^* M_t,$$

где M_t – масштаб времени, M_t=[с/(ед. измерения переменной)].

В фишке V_i сети содержится информация о состоянии i-го объекта $V_i(v_1,v_2,...,v_n)$. При изменении состояния i-й компоненты происходит передача фишки V_i во входную позицию $x_{[N+1,i]}$. Если в позиции $x_{[N+1,H]}$ фишка отсутствует, то происходит срабатывание перехода $C_{y[N+1]}$. На основании анализа состояния i-й компоненты $Z_i[t_v]$ и $Z_{N+1}[t_v]$ происходит вычисление нового глобального состояния $\overline{Z}_{N+1}[t_{v+1}]$ $N+1$-компоненты. Процесс вычисления эндогенных переменных предлагается возложить на алгоритмическую схему моделирования [5], реализованную с помощью макроперехода C_H. Процесс деятельности АСМ носит, как правило, распределенный характер во времени и позволяет аппроксимировать функциональное действие с требуемой детализацией. Далее поток фишек обрабатывается переходом $C_{x[N+1]}$, который осуществляет запись V_i в позицию $y_{[n+1,l]}$, $l=\{2,...,L+1\}$ где L – число состояний в $N+1$ компоненте, которая соответствует глобальному состоянию компоненты ($b(R2)=l$). После этого происходит передача фишки (информации) от объекта $N+1$ к смежным компонентам модели.

Представленная архитектура построения аналитико-имитационной модели позволяет имитировать функционирование технических объектов с учетом сложных причинно-следственных связей и разнородной пространственно-временной организации компонентов системы. Как показывает анализ построения компонентов моделей Е-сетевым аппаратом, большинство схем реализуется по принципу C_Y–C_H–C_X, где C_H – макропереход, реализующий нижестоящий иерархический уровень компоненты модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1998. – 319 с.
2. Технология системного моделирования / Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов и др.; Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. – 312 с.
3. Гиг Дж.Ван. Прикладная общая теория систем. Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 336 с.
4. Голдаев С.В., Ляшков Б.А. Основы математического моделирования в теплотехнике. – Томск: Изд-во ТПУ,1999. – 106 с.
5. Вопросы алгоритмического моделирования сложных систем // Сб. научн. трудов / Отв. ред. В.В. Иванищев. – Л.: ЛИИАН, 1989. – 235 с.

УДК 004.657